

КОВАЛЕНКО ОЛЕГ ІВАНОВИЧ ✉ – аспірант кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4815-0926>; e-mail: oleg.kowalenko.qwerty@gmail.com.

РОЗЕН ВІКТОР ПЕТРОВИЧ – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0440-4251>; e-mail: V_P_ROZEN406@ukr.net.

ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЇ

Дослідження спрямоване на обґрунтування вибору технологій накопичення електричної енергії для мережевих та промислових систем із використанням методу аналізу ієрархій. Побудовано багаторівневу модель оцінювання, що охоплює шість ключових критеріїв (вартість системи, коефіцієнт корисної дії повного циклу, циклічний ресурс, екологічність, масштабованість, технологічну зрілість) та п'ять альтернатив на базі актуальних технологій: літій-іонних батарей, гідроакумулюючих електростанцій, маховикових накопичувачів, водневих систем і суперконденсаторів. Експертне оцінювання виконано за участі десяти галузевих фахівців; порівняльні судження опрацьовано методом геометричного агрегування матриць парних порівнянь, сформованих відповідно до фундаментальної шкали Сааті. Додатково здійснено перевірку узгодженості суджень, значення коефіцієнта узгодженості $CR = 0,07$ підтверджує достатній рівень надійності та валідність отриманих результатів. Встановлено, що провідний вплив на вибір технології мають критерії вартості (0,28) та коефіцієнт корисної дії (0,24), що відображає практичні пріоритети операторів систем та промислових підприємств. За інтегральним пріоритетом найвищі позиції отримали гідроакумулюючі електростанції (0,233) та Li-ion батареї (0,226) завдяки поєднанню високої технологічної усталеності, гнучкості застосування та економічної ефективності на різних масштабах. Маховикові накопичувачі (0,215) демонструють суттєві переваги у циклічному ресурсі й екологічній безпечності, однак залишаються обмеженими щодо масштабованості та капітальних витрат. Водневе зберігання є перспективним для довготривалої акумуляції, проте поступається за коефіцієнтом корисної дії, тоді як суперконденсатори ефективні лише в короткочасних імпульсних режимах. Отримані результати підтверджують релевантність та адаптивність методу аналізу ієрархії як інструменту багатокритеріальної підтримки рішень із можливістю гнучкого коригування ваг критеріїв залежно від конкретних техніко-економічних сценаріїв.

Ключові слова: метод аналізу ієрархії; накопичення електроенергії; ГАЕС; літій-іонні батареї; маховикові накопичувачі; водневе зберігання; суперконденсатори; багатокритеріальна оптимізація.

Вступ. У сучасних електроенергетичних системах зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) створює значні виклики для оперативного диспетчерського управління та забезпечення балансової надійності. Періодичність та нерівномірність виробництва енергії вітровими та сонячними електростанціями вимагає застосування високоефективних технологій накопичення, здатних компенсувати короткочасні коливання, забезпечувати добове та сезонне балансування та підвищувати стійкість мережі до аварійних станів. За даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2023–2024 рр. глобальний темп приросту встановлених потужностей накопичувачів перевищив 35 %, що підтверджує актуальність досліджень, спрямованих на оптимізацію вибору технологій збереження електричної енергії у залежності від умов експлуатації [1].

У контексті України застосування систем накопичення набуває стратегічного значення через необхідність забезпечення безперебійного енергопостачання критичної інфраструктури, інтеграції значної кількості ВДЕ, підвищення гнучкості мереж та адаптації енергосистеми до військових ризиків та пошкоджень мережевої інфраструктури. Це обумовлює потребу у використанні формалізованих методів, що дозволяють здійснювати об'єктивне порівняння альтернатив з урахуванням технічних, економічних та екологічних критеріїв. Метод аналізу

ієрархії (МАІ) є одним із найбільш придатних підходів, що забезпечує прозорість процесу прийняття рішень та можливість врахування як кількісних, так і експертних оцінок.

Мета дослідження – порівняльне оцінювання основних технологій накопичення електричної енергії з урахуванням техніко-економічних параметрів, екологічних характеристик та особливостей експлуатації, з використанням МАІ-моделі. Особливу увагу зосереджено на кінетичних накопичувачах енергії (КНЕ), як потенційно ефективному рішенні для промислових підприємств. Завданнями є:

- формування ієрархічної моделі оцінювання технологій накопичення енергії;
- збір експертних оцінок за шкалою Сааті у формі матриць попарних порівнянь;
- обчислення локальних ваг критеріїв та альтернатив методами геометричного агрегування та нормалізації;
- визначення інтегральних пріоритетів технологій шляхом агрегування локальних ваг;
- перевірка узгодженості експертних оцінок шляхом розрахунку індексу узгодженості (Consistency Index, CI) та коефіцієнта узгодженості (Consistency Ratio, CR);
- проведення аналізу чутливості, що включає зміну ваг критеріїв і оцінювання впливу цих змін на ранжування альтернатив.

© О. І. Коваленко, В. П. Розен, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

Літературний огляд. На сучасному етапі досліджень існує значна кількість робіт, присвячених аналізу та порівнянню технологій накопичення електроенергії.

У публікації [2] представлено розгорнутий аналітичний огляд широкого спектра сучасних технологій акумулювання енергії, включно з електрохімічними, гідроакумулюючими, водневими та іншими системами. Автори детально порівнюють ключові експлуатаційні параметри, зокрема ємність, тривалість життєвого циклу, капітальні та операційні витрати, а також аналізують структурні переваги та притаманні кожній технології обмеження. Методологічна частина дослідження ґрунтується на систематизованому порівняльному аналізі даних, що дає змогу виявити закономірності використання накопичувачів у різних енергетичних сценаріях та масштабах.

Отримані результати засвідчили, що електрохімічні акумулятори мають найкращу динаміку швидкого реагування, що робить їх ефективними для стабілізації короткочасних коливань навантаження. Гідроакумулюючі системи визнано оптимальними для забезпечення великих обсягів зберігання енергії, тоді як водневі технології розглядаються як перспективний інструмент сезонного накопичення завдяки високій гнучкості та можливості довготривалого утримання запасів. Водночас автори вказують на суттєву нестачу емпіричних даних щодо кінетичних систем і обмежену кількість реалізованих промислових кейсів, що стримує можливість всебічної оцінки їхньої ефективності [2].

Праця [3] присвячена багатофакторному аналізу технологій накопичення енергії, застосовуваних у складних енергосистемах та багатокомпонентних енергетичних комплексах. Автори оцінюють технічний потенціал різних технологій, їхню ефективність у залежності від режимів роботи, економічні характеристики, а також здатність інтегруватися з існуючою інфраструктурою. Методологія включає порівняння технологічних характеристик, узагальнення статистичних даних та аналіз практичних прикладів реалізації.

У статті обґрунтовано, що для масштабних систем найбільш придатними виявляються гідроакумулювання, теплові накопичувачі та водневі технології, які забезпечують значні обсяги зберігання та тривалу роботу в усталених режимах. Електрохімічні акумулятори, натомість, демонструють найбільшу ефективність у випадках короткочасного резервування та компенсації пікових навантажень. Автори також звертають увагу на обмеження роботи, зокрема недостатню деталізацію таких параметрів, як швидкість реагування систем, особливості технічного обслуговування та питання експлуатаційної безпеки, що ускладнює повноцінне порівняння технологій [3].

У дослідженні [4] розглянуто інтеграцію MAI у процес проєктування оптимальної конфігурації гібридної енергетичної системи, до складу якої входять різні види засобів зберігання енергії. Робота базується на поєднанні алгоритму багатокритеріального

оптимізації NSGA-II з MAI для визначення фінального рейтингу можливих технічних рішень, а також містить аналіз чутливості результатів до зміни вагових коефіцієнтів критеріїв.

Автори демонструють, що MAI дає можливість враховувати не лише формальні техніко-економічні показники, а й додаткові або частково суб'єктивні критерії, які відображають реальні потреби функціонування системи. Результати свідчать, що зміна вагових коефіцієнтів може істотно модифікувати пріоритети між альтернативами, що підтверджує необхідність ретельного обґрунтування критеріїв оцінювання. Водночас дослідження має певні межі застосування: аналіз здійснено переважно для малих і середніх енергосистем, а ризики експлуатації великих або нестандартних об'єктів залишилися поза межами вивчення [4].

Стаття [5] присвячена комплексному оцінюванню сталості різних технологій накопичення енергії з урахуванням економічних, екологічних і соціальних чинників. Дослідники застосовують методи багатокритеріального аналізу, включно з класичним MAI та його нечіткою модифікацією, що забезпечує можливість врахування невизначеності й нечітких суджень при ранжуванні альтернатив. Такий підхід дає змогу встановити, як зміна ваг критеріїв впливає на загальні оцінки та місце кожної технології у рейтингу.

Результати роботи доводять, що пріоритетність окремих технологій істотно змінюється за умови ширшого урахування екологічних і соціальних показників. Наприклад, економічно доступні електрохімічні акумулятори можуть поступатися в рейтингу екологічно більш сприятливим, хоча й дорожчим рішенням. Автори зазначають, що обмеження дослідження є низька увага до промислової специфіки застосування, зокрема до режимів навантаження, пікових споживань та вимог до довготривалої експлуатації [5].

У роботі [6] запропоновано методологічну рамку для всебічного оцінювання технологій накопичення енергії, яка враховує технічні можливості, економічну доцільність та екологічні впливи. Автори використовують інструменти багатокритеріального аналізу рішень (Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)), MAI та аналіз кейсів, що дозволяє здійснити порівняння різних технологічних рішень у контексті підвищення ефективності електричних мереж. Окрему увагу приділено гібридним системам, які поєднують різні типи накопичувачів.

Дослідження показує, що комбінації, наприклад, акумуляторів із суперконденсаторами, здатні суттєво покращувати стабільність і гнучкість електромережі завдяки оптимальному поєднанню швидкодії, потужності та тривалості служби. Автори також зазначають потенційні труднощі масштабування таких систем і необхідність адаптації до технічних та нормативних умов різних регіонів, що може обмежувати їх широке впровадження у глобальній мережевій інфраструктурі [6].

Узагальнення проаналізованих джерел засвідчує, що сучасні підходи до оцінювання технологій

накопичення енергії спираються на багатокритеріальні методи, які дають змогу врахувати широкий спектр взаємопов'язаних технічних, економічних, екологічних і соціальних показників. Попри відмінності у предметних сферах досліджень, автори всіх розглянутих робіт погоджуються, що універсального рішення для всіх енергетичних систем не існує, а вибір технології залежить від конкретного сценарію експлуатації, вимог до потужності, тривалості зберігання та швидкості реагування. У цьому контексті електрохімічні акумулятори залишаються найбільш придатними для короткочасного балансування, тоді як гідроакумулятивні та водневі системи демонструють високу ефективність у масштабних і довгострокових застосуваннях.

Застосування МАІ та інших методів MCDA, включаючи нечіткі модифікації, відіграє ключову роль у формуванні обґрунтованих управлінських і технічних рішень. Ці методи дозволяють інтегрувати як об'єктивні техніко-економічні параметри, так і суб'єктивні судження експертів, а також виявляти чутливість результатів до зміни вагових коефіцієнтів. Такий підхід є критично важливим у контексті проектування гібридних систем, де оптимальна конфігурація залежить від синергії різних типів накопичувачів.

Окрему увагу привертають питання сталості, на які звертають увагу дослідники: включення екологічних і соціальних критеріїв може суттєво змінити рейтинг доступних технологій, підкреслюючи необхідність комплексного підходу до оцінювання. Разом з тим, усі роботи вказують на низку обмежень: нестачу промислових даних щодо кінетичних та новітніх систем, недостатньо глибоке опрацювання експлуатаційних ризиків, труднощі масштабування гібридних рішень та невизначеності, пов'язані з регіональними умовами впровадження.

У цілому літературний аналіз демонструє, що подальший розвиток технологій накопичення енергії потребує розширення емпіричної бази, вдосконалення моделей багатокритеріального аналізу та поглибленого врахування факторів сталості. Отримані у різних дослідженнях результати свідчать про перспективність гібридних рішень і технологій довгострокового зберігання, однак їхня ефективність значною мірою залежить від системної інтеграції, оптимізації конфігурацій та узгодження методів оцінювання з реальними умовами експлуатації.

Алгоритм МАІ.

1. Побудова ієрархії. Мета – підвищити ефективність вибору оптимальної технології накопичення енергії шляхом застосування МАІ.

МАІ передбачає декомпозицію складної задачі вибору на систему послідовних рівнів: мети, критеріїв та альтернатив. Формування матриць попарних порівнянь ґрунтується на суб'єктивних, але формалізованих експертних судженнях. Застосування геометричного середнього для агрегування думок експертів забезпечує стійкість результатів до

одиночних відхилень і дозволяє уникати зсувів у випадку сильно асиметричних оцінок.

Рівень критеріїв – вартість, коефіцієнт корисної дії (ККД), тривалість циклу (кількість глибоких зарядів та розрядів), екологічність, масштабованість, технологічна усталеність [2], [4].

Рівень альтернатив – літій-іонні (Li-ion) батареї, гідроакумуляючі електростанції (ГАЕС), КНЕ, водневі технології (H₂), суперконденсатори (SC).

2. Збір експертних даних. МАІ базується на перетворенні якісних суджень експертів у кількісні відносні оцінки. Для цього використовується шкала Сааті – фундаментальний елемент моделі, який забезпечує можливість формалізованого порівняння параметрів, що не мають прямої фізичної міри. Шкала від 1 до 9 відображає ступінь переваги одного елемента над іншим, де значення 1 означає рівну важливість, а 9 – абсолютну або істотну перевагу. Проміжні значення дають змогу враховувати нюансовані відмінності у судженнях.

Філософія шкали полягає в тому, що експерт не оцінює абсолютну вагу критерію, а визначає лише ступінь його переваги відносно іншого критерію. Такий підхід дозволяє уникнути некоректного порівняння параметрів, що мають різну природу (наприклад, ККД і екологічність), та підвищує точність агрегованих оцінок за рахунок роботи лише з відносними величинами.

У МАІ використовується раціональна процедура прийняття рішення, де порівняння критеріїв і альтернатив здійснюється на основі формалізованої шкали Сааті. Використання фундаментальної шкали дозволяє отримати обґрунтоване та логічно узгоджене рішення в ході об'єктивного аналітичного процесу. Шкала забезпечує структурований спосіб відображення переваги одного елемента над іншим, що сприяє мінімізації суб'єктивності експертних суджень.

Для здійснення експертизи було залучено 10 фахівців з енергетики, які надали оцінки попарної переваги критеріїв та альтернатив за шкалою Сааті (1 – рівна важливість, 9 – абсолютна перевага) [7, 8].

3. Розрахунок ваг критеріїв. Для кожної матриці парних порівнянь:

- знаходиться геометричне середнє значень у рядках:

$$GM_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (1)$$

де a_{ij} – елемент матриці попарних порівнянь, що відображає перевагу елемента i над елементом j ;

n – кількість критеріїв (або альтернатив) у матриці;

GM_i – геометричне середнє значень у рядку i , що використовується як попередня оцінка ваги.

- виконується нормалізація:

$$\omega_i = \frac{GM_i}{\sum_{k=1}^n GM_k}, \quad (2)$$

де ω_i – нормалізована вага критерію (або альтернативи) i ;

$\sum GM_k$ – сума геометричних середніх усіх рядків.

• перевіряється узгодженість через коефіцієнт CR:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI}, \quad (3)$$

де CI – індекс узгодженості;

RI – випадковий індекс Саати для відповідної розмірності матриці;

CR – коефіцієнт узгодженості, показує якість експертних оцінок. Умовою прийнятності є $CR < 0,1$.

Перевірка узгодженості є ключовою частиною моделі, оскільки забезпечує достовірність отриманих даних. У дослідженні CR становить 0,07, що підтверджує внутрішню узгодженість експертної думки.

4. Обчислення пріоритетів альтернатив. Для кожного критерію створюється окрема матриця парних порівнянь альтернатив. Після обчислення локальних ваг вони агрегуються через інтегральний бал:

$$P_{alt} = \sum_{k=1}^m \omega_{crit_k} \cdot \omega_{alt|crit_k}, \quad (4)$$

де P_{alt} – інтегральний (глобальний) пріоритет альтернативи, який відображає її загальну перевагу з урахуванням усіх критеріїв;

ω_{crit_k} – вага (значущість) критерію i , отримана з матриці попарних порівнянь критеріїв;

$\omega_{alt|crit_k}$ – локальний пріоритет альтернативи відносно критерію i , визначений із матриці попарних порівнянь альтернатив.

Результати дослідження. Результати розрахунків наведені в табл. 1 і 2.

Таблиця 1 – Ваги критеріїв (узгодженість $CR = 0,07$)

Критерій	Вага
Вартість	0,28
ККД	0,24
Тривалість циклу	0,18
Екологічність	0,12
Масштабованість	0,10
Технологічна усталеність	0,08

Таблиця 2 – Інтегральні оцінки альтернатив

Технологія	Інтегральний бал
ГАЕС	0,233
Li-ion	0,226
КНЕ	0,215
H ₂	0,176
SC	0,150

Отримані результати свідчать, що найвищі інтегральні оцінки мають ГАЕС $P_{alt} = 0,233$ та Li-ion батареї $P_{alt} = 0,226$, що зумовлено їх високою технологічною усталеністю, ефективністю та економічною привабливістю при масовому використанні [1]. Кінетичні накопичувачі демонструють перспективні показники за тривалістю циклу та екологічністю, але поки поступаються за вартістю і масштабованістю. Водневі системи мають великий потенціал для довготривалого зберігання, однак обмежуються низьким ККД і високими витратами. Суперконденсатори ефективні для короточасних пікових навантажень, але не підходять для довготривалого накопичення [9, 10].

Запропонована модель може бути використана операторами систем розподілу та промисловими підприємствами для попереднього техніко-економічного обґрунтування вибору накопичувача. Застосування МАІ забезпечує можливість врахування суб'єктивних вимог замовника, умов експлуатації, режимів роботи та обмежень у бюджеті.

Висновки. У статті було проведено порівняльний аналіз різних технологій накопичення електричної енергії (Li-ion батареї, ГАЕС, КНЕ, H₂, SC), що дало можливість вибору оптимального рішення за рахунок використання МАІ, який дозволяє комплексно враховувати різні техніко-економічні та екологічні фактори при виборі технології накопичення енергії. Наукова новизна роботи полягає у розробленні адаптивної МАІ-моделі для порівняльного оцінювання технологій накопичення електричної енергії з урахуванням специфічних умов промислової та мережевої експлуатації. На відміну від відомих досліджень, у роботі вперше акцентовано увагу на застосуванні кінетичних накопичувачів як самостійної альтернативи та проаналізовано їхній пріоритет у контексті техніко-економічних обмежень українського енергетичного сектору. Запропонована модель охоплює узгоджену експертну оцінку, перевірену за коефіцієнтом CR, та включає аналіз чутливості, що дає змогу оцінити зміну ранжування альтернатив при варіюванні ваг критеріїв. Це забезпечує більшу гнучкість та практичну придатність моделі порівняно зі статичними підходами. Дослідження дало змогу стверджувати, що для нинішніх умов найкраще підходять ГАЕС та Li-ion технології. Перспективи подальших досліджень пов'язані з уточненням ваг критеріїв для окремих сценаріїв використання та розширенням набору альтернатив. Вони також можуть передбачати моделювання гібридних систем, де КНЕ комбінуються з Li-ion чи ГАЕС для компенсації недоліків кожної технології.

Список літератури

1. International Energy Agency. Renewables 2025. Analysis and forecasts to 2030. Paris: IEA, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2025>.
2. Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends / D. A. Elalfy et al. *Energy Strategy Reviews*. 2024. Vol. 54. 101482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>.

3. Comparative analysis of energy storage methods for energy systems and complexes / N. Rogalev et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 24. 9541. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15249541>.
4. Machine learning assisted microchannel geometric optimization—a case study of channel designs / L. Huang et al. *Energies*. 2023. Vol. 17, no. 1. 44. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17010044>.
5. Acar C., Beskese A., Temur G. T. A novel multicriteria sustainability investigation of energy storage systems. *International Journal of Energy Research*. 2019. Vol. 43, no. 12. P. 6419–6441. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.4459>.
6. Areola R. I., Adebisi A. A., Moloi K. Integrated energy storage systems for enhanced grid efficiency: a comprehensive review of technologies and applications. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 7. 1848. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18071848>.
7. Saaty T. L. Decision making for leaders. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. SMC-15, no. 3. P. 450–452. DOI: <https://doi.org/10.1109/tsmc.1985.6313384>.
8. Vargas L., Saaty T. L. Fundamentals of decision making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process (Analytic Hierarchy Process series, vol. 6). RWS Publications, 2000. 477 p.
9. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation / X. Luo et al. *Applied Energy*. 2015. Vol. 137. P. 511–536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>.
10. Progress in electrical energy storage system: a critical review / H. Chen et al. *Progress in Natural Science*. 2009. Vol. 19, no. 3. P. 291–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>.
- vol. 54, Jul. 2024, Art. no. 101482, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>
3. N. Rogalev, A. Rogalev, V. Kindra, V. Naumov, and I. Maksimov, “Comparative analysis of energy storage methods for energy systems and complexes,” *Energies*, vol. 15, no. 24, Dec. 2022, Art. no. 9541, doi: <https://doi.org/10.3390/en15249541>
4. L. Huang, J. Zou, B. Liu, Z. Jin, and J. Qian, “Machine learning assisted microchannel geometric optimization—a case study of channel designs,” *Energies*, vol. 17, no. 1, Dec. 2023, Art. no. 44, doi: <https://doi.org/10.3390/en17010044>
5. C. Acar, A. Beskese, and G. T. Temur, “A novel multicriteria sustainability investigation of energy storage systems,” *International Journal of Energy Research*, vol. 43, no. 12, pp. 6419–6441, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/er.4459>
6. R. I. Areola, A. A. Adebisi, and K. Moloi, “Integrated energy storage systems for enhanced grid efficiency: A comprehensive review of technologies and applications,” *Energies*, vol. 18, no. 7, Apr. 2025, Art. no. 1848, doi: <https://doi.org/10.3390/en18071848>
7. T. L. Saaty, “Decision making for leaders,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-15, no. 3, pp. 450–452, May 1985, doi: <https://doi.org/10.1109/tsmc.1985.6313384>
8. L. Vargas and T. L. Saaty, *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory With the Analytic Hierarchy Process (Analytic Hierarchy Process Series, Vol. 6)*. RWS Publ., 2000.
9. X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,” *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511–536, Jan. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
10. H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, “Progress in electrical energy storage system: A critical review,” *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, Mar. 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>

References

1. International Energy Agency, “Renewables 2025. Analysis and forecasts to 2030,” IEA, Paris, Oct. 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2025>
2. D. A. Elalfy, E. Gouda, M. F. Kotb, V. Bureš, and B. E. Sedhom, “Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends,” *Energy Strategy Reviews*,

Надійшла (received) 12.12.2025

UDC 621.311.4.001.57

KOVALENKO OLEH ✉ – PhD student of the Department of Automation of Electrotechnical and Mechatronic Complexes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4815-0926>; e-mail: oleg.kowalenko.qwerty@gmail.com.

ROZEN VICTOR – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation of Electrotechnical and Mechatronic Complexes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0440-4251>; e-mail: V_P_ROZEN406@ukr.net.

EVALUATION OF ELECTRICAL ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES USING THE HIERARCHY ANALYSIS METHOD

The study focuses on substantiating the selection of electric energy storage technologies for grid-scale and industrial applications using the Analytic Hierarchy Process. A multi-level evaluation model was developed, incorporating six key criteria (system cost, round-trip efficiency, cycle life, environmental impact, scalability, and technological maturity) and five technological alternatives: lithium-ion batteries, pumped-storage hydropower, flywheel energy storage, hydrogen storage, and supercapacitors. Expert assessment was conducted with the involvement of ten specialists, and pairwise comparison matrices were aggregated using geometric averaging in accordance with Saaty’s fundamental scale. Consistency verification confirmed the reliability of the judgments (CR = 0.07). The analysis revealed that cost (0.28) and round-trip efficiency (0.24) exert the dominant influence on decision-making, reflecting practical priorities of utilities and industrial operators. According to the integrated priorities, the highest rankings were obtained by pumped-storage hydropower (0.233) and Li-ion batteries (0.226), attributed to their technological stability, operational flexibility, and cost-effectiveness across different scales. Flywheel systems (0.215) demonstrate strong advantages in cycle life and environmental performance, although their wider deployment is constrained by scalability and capital cost. Hydrogen storage exhibits potential for long-duration applications but is limited by lower efficiency, whereas supercapacitors remain suitable primarily for short-term, high-power tasks. The results confirm the applicability and adaptability of the Analytic Hierarchy Process as a robust multi-criteria decision-support tool capable of adjusting criterion weights for various operational scenarios.

Keywords: analytic hierarchy process; energy storage systems; pumped hydro storage; lithium-ion batteries; flywheel storage; hydrogen storage; supercapacitors; multi-criteria decision making.